

# 車両駆動用リニア誘導モータの等価回路のための 試験方法とその問題点

野崎 雄一郎, 古関 隆章 (東京大学)

## Testing Method and the Problem on the Equivalent Circuit of Linear Induction Motor for Transport Traction

Yuichiro Nozaki, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

Linear Induction Motor(LIM) are adopted to Linear Metro and HSST for the traction system in Japan. The equivalent circuit constants and the motor constants depend on its secondary speed because of its end-effect. The LIM moves in a straight line unlike rotary type, therefore it is impossible to measure the performance and difficult to identify the constants without the special test facility except for stand still state. The problem of its measurement method is described and the alternative way of no-load measurement is sought in this paper.

**キーワード:** 試験方法, 数値解析, 等価回路, ベクトル制御, リニア誘導モータ

**Keywords:** Testing, Numerical analysis, Equivalent circuit, Field oriented control, Linear Induction Motor

### 1. はじめに

リニア誘導モータ (LIM) 駆動の交通システムは、厄介な粘着から解放され急勾配の走行も可能となり、台車自由度向上から急曲線が走行可能となるため、これまでに磁気浮上車の HSST や車輪支持小断面地下鉄リニアメトロですでに実用化され、今後も普及が進むと考えられる。この方式は地上二次・車両一次で構成されるため、地上側は导体板と二次鉄心のみ構成となるだけでなく、制御装置もこれまでの回転型誘導モータとの共通性から、低コストであるという長所がある。

しかし、LIM は「端」を持ち回転型やリニア同期モータと比較すると、端部の影響でギャップ中の磁束が不均一となり「端効果」による性能劣化や特性の変化が大きな問題となる。現在は LIM 駆動車両は最高 100km/h 程度であるが、今後、世界市場などへ展開を狙う際には、最高速度や性能の向上などが必要となるであろう。そのため、設計法や性能試験方法などを確立しておく必要があると考えられる。

筆者らはこれまでに回転型誘導モータ制御理論の LIM への拡張を考え、回転型モータの等価回路の各定数を速度の関数として扱った LIM の等価回路を提案してきた<sup>(1)</sup>。一方で、LIM は動作試験が場所・設備などの制限からほとんどの場合、静止試験 (拘束試験) のみに限られ、高速域までの正確な特性評価が不可能であり、特性計算との整合性を取ることも困難である。本論文では LIM の静止試験のみで他の動作点、例えば無負荷試験の等価的な試験を行う方法を考える。同様な手法は参考文献<sup>(2)(3)</sup>で試みられているが、無負荷状態での端効果は考慮されていない。

### 2. リニア誘導モータの端効果

LIM は回転型と同様に一次巻線に多相交流を流しギャップ中に進行磁界を発生させ、これと対向した二次导体上に誘導されるうず電流との作用によって推力が発生させる。ここで、図 1 のように車両 (一次側) が左向きに進行している場合に二次側から一次巻線が作る磁束を観測することを考える。これから LIM が接近してくる左側 (入口端) で

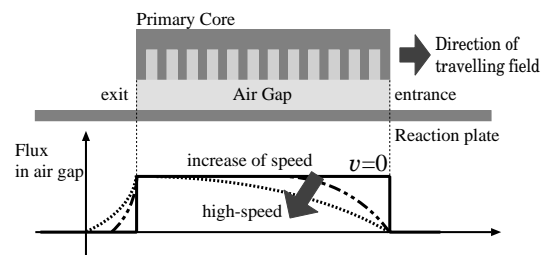


図 1 LIM の端効果

Fig. 1. End-effect of LIM

観測すると、それまで 0 であった磁束が急激に立ち上がろうとする。一方、LIM が離れていく右側 (出口端) で観測すると、それまで存在していた磁束が急に消失しようとする。従って、入口端、出口端それぞれで起ころうとする急激な磁束変化を妨げるように、二次側にうず電流が発生する。これにより、実際観測される磁束は入口端では緩やかに立ち上がり、出口端では徐々に消失していく波形となる。回転型モータでは端がないため常に均一な磁束が生じているが、LIM ではこのように端の存在のため速度に応じて不均一な磁束分布となる。これが端効果であり<sup>(4)</sup>、機械的の速度の増加と共に推進力の減少やエネルギー損失の増加の原因となる。

### 3. 静止試験による等価的な無負荷試験法

〈3・1〉 無負荷状態における端効果 端効果により、一次側から観測する二次側の導体の導電率や鎖交磁束・もれ磁束などモータの定数が速度やすべりにより変化する。一方、無負荷試験の状態を考えた場合でも、回転型とは大きく異なり二次側導体にはうず電流が流れる。二次元数値計算で確認するために、図2を考える。

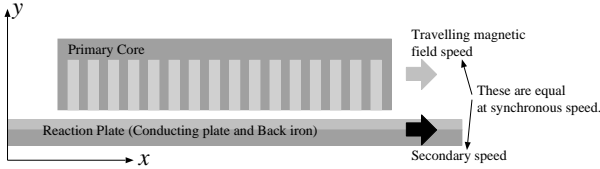


図2 LIM 二次元モデルと無負荷状態

Fig. 2. 2D-model of LIM and its no-load state

モデルとして地下鉄用 LIM<sup>(5)</sup> を利用した場合の、定格速度 40km/h 付近の無負荷状態の磁束密度とうず電流分布の解析結果を図3・図4に示す。

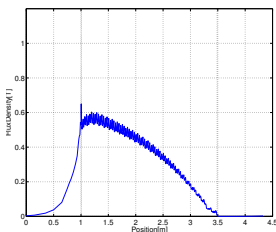


図3 磁束密度

Fig. 3. Flux Density

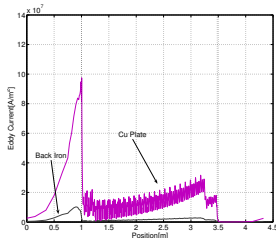


図4 二次うず電流

Fig. 4. Eddy-current

このように、無負荷状態においても端効果によってギャップ磁束の立ち上がりを妨げるよううず電流が二次側に存在することが分かる。つまり、無負荷試験状態を静止状態で等価的に行うためには、二次側導体板のみを取り除くだけでは不十分であることが言える。

〈3・2〉 静止試験による無負荷試験代替法の提案 図5に示すように、無負荷状態での端効果により二次側に流れるうず電流と等価となる、すなわち、一次側から見たインピーダンスが等しくなるように静止した状態で導体板を挿入することを考えることで、拘束試験による等価的な無負荷試験状態とする。なお、二次鉄心は余計な影響を抑えるためラミネートを仮定し、導電率はないものとする。

図6に地下鉄用 LIM における同期速度と導体板をスロット単位で挿入した場合の関係を示す。また、図7・図8に、同期速度を 40km/h とし導体板を挿入した場合の磁束密度と二次うず電流の分布をそれぞれ示す。

### 4. おわりに

LIM は場所的制約が大きく、動作試験が静止試験のみに限られてしまう一方で端効果によりその性能が速度に依存し、無負荷状態においても二次側にうず電流が流れること

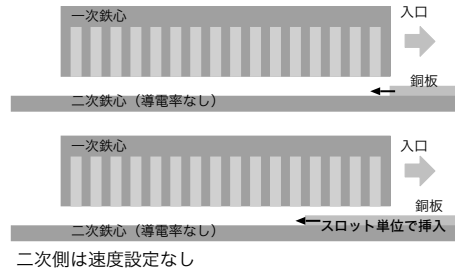


図5 導体板挿入による等価無負荷試験

Fig. 5. Equivalent no-load test by inserting conducting plate

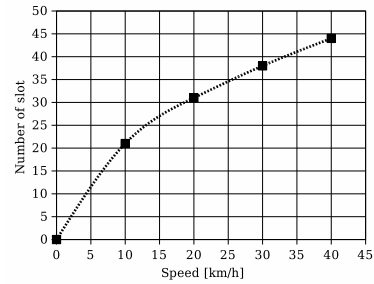


図6 同期速度と導体板挿入量

Fig. 6. Relation between synchronous speed and amount of inserting conducting plate

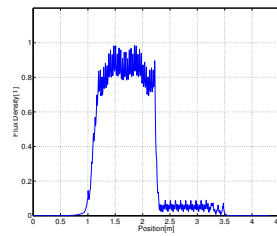


図7 磁束密度

Fig. 7. Flux Density

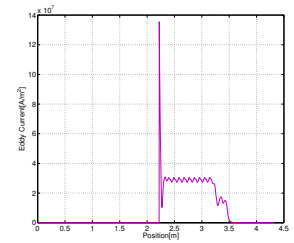


図8 二次うず電流

Fig. 8. Eddy-current

を考慮に入れなければならない。ここでは、静止状態に無負荷状態と見なせるインピーダンスとなるように導体を挿入し等価的な無負荷試験方法を提案した。このように拘束状態以外の試験が等価的に可能となれば、LIM のさらなる高度化・高性能化を目指せるであろう。

### 文 献

- (1) Y. Nozaki, T. Yamaguchi, T. Koseki: "A Equivalent Circuit Model to Assist Vector Control of a Linear Induction Motor for Urban Transportation System Considering End-effect," Proc. LDIA 2007, CD-ROM (2007)
- (2) 山本 修, 荒 隆裕: 「直流試験法による各種二次導体に対するリニア誘導モータの特性評価」, 平成 11 年電気学会産業応用部門大会, pp.149-152 (2000)
- (3) 杉本 英彦, 巴 正信, 松村 正三, 石井 敏昭: 「片側式リニア誘導モータの拘束試験に基づく非対称定数算定法」, 電学論 D, 113 巻 2 号, pp.247-255 (1994)
- (4) T. Koseki, R. Mano, T. Mizuma: "Flux Synthesis of a Linear Induction Motor for Compensating End-Effect Based on Insight of a Control Engineer," Proc. LDIA 2003, pp.359-362 (2003)
- (5) 樋口 剛, 野中 作太郎, 安藤 正博: 「地下鉄用リニア誘導モータの高効率化について」, T.IEE Japan, Vol. 120-D, No. 8/9 pp.1008-1014 (2000)